

15. 6. 2004

日本国特許庁  
JAPAN PATENT OFFICE

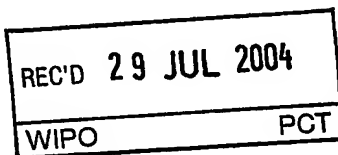
別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日  
Date of Application: 2003年 8月 6日

出願番号  
Application Number: 特願2003-288110  
[ST. 10/C]: [JP 2003-288110]

出願人  
Applicant(s): TDK株式会社

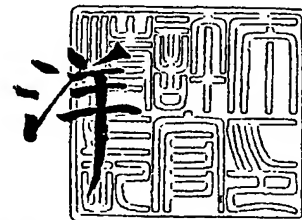


PRIORITY DOCUMENT  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

2004年 7月15日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

小川



BEST AVAILABLE COPY

【書類名】 特許願  
【整理番号】 99P05706  
【提出日】 平成15年 8月 6日  
【あて先】 特許庁長官 殿  
【国際特許分類】 G02B 5/00  
G02B 6/00  
【発明者】  
【住所又は居所】 東京都中央区日本橋一丁目 1 3 番 1 号 T D K株式会社内  
【氏名】 榎戸 靖  
【特許出願人】  
【識別番号】 000003067  
【氏名又は名称】 T D K株式会社  
【代理人】  
【識別番号】 100100077  
【弁理士】  
【氏名又は名称】 大場 充  
【手数料の表示】  
【予納台帳番号】 085823  
【納付金額】 21,000円  
【提出物件の目録】  
【物件名】 特許請求の範囲 1  
【物件名】 明細書 1  
【物件名】 図面 1  
【物件名】 要約書 1

**【書類名】特許請求の範囲****【請求項 1】**

第 1 の誘電体と当該第 1 の誘電体と異なる比誘電率を有する第 2 の誘電体とが同一面内に周期的に配置されたセラミックス複合体が積層されて構成されたフォトニック結晶の製造方法であって、

前記セラミックス複合体は、

前記第 1 の誘電体に対応する部位に前記第 1 の誘電体を構成する第 1 のセラミックス組成物を配設し、

前記第 2 の誘電体に対応する部位に前記第 2 の誘電体を構成する第 2 のセラミックス組成物を配設することにより作製されることを特徴とするフォトニック結晶の製造方法。

**【請求項 2】**

前記第 1 のセラミックス組成物を配設した後に、前記第 2 のセラミックス組成物を配設することにより得られた複数の前記セラミックス複合体を積層することを特徴とする請求項 1 に記載のフォトニック結晶の製造方法。

**【請求項 3】**

前記第 1 のセラミックス組成物を配設した後に、前記第 2 のセラミックス組成物を配設することにより前記セラミックス複合体を作製し、

当該セラミックス複合体上に、前記第 1 のセラミックス組成物および前記第 2 のセラミックス組成物のいずれか一方を配設した後に前記第 1 のセラミックス組成物および前記第 2 のセラミックス組成物の他方を配設することを繰り返すことにより前記セラミックス複合体が積層されることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載のフォトニック結晶の製造方法。

**【請求項 4】**

前記セラミックス複合体の積層体を焼成する工程をさらに備えることを特徴とする請求項 1 ～ 3 のいずれかに記載のフォトニック結晶の製造方法。

**【請求項 5】**

前記フォトニック結晶は、2 次元周期構造を有することを特徴とする請求項 1 ～ 4 のいずれかに記載のフォトニック結晶の製造方法。

**【請求項 6】**

第 1 の誘電体と、当該第 1 の誘電体と異なる比誘電率を有する第 2 の誘電体とが所定の周期で配置されるフォトニック結晶であって、

前記第 1 の誘電体および前記第 2 の誘電体は誘電体セラミックスであり、

前記第 2 の誘電体は直径 2 mm 以下の円柱として、ブロック状の前記第 1 の誘電体の表裏面を貫通するように所定間隔毎に配置されていることを特徴とするフォトニック結晶。

【書類名】明細書

【発明の名称】フォトニック結晶の製造方法およびフォトニック結晶

【技術分野】

【0001】

本発明は、フォトニック結晶の製造方法およびフォトニック結晶に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、誘電率を周期的に変化させたフォトニック結晶が注目を浴びている。フォトニックバンドギャップ（以下、単に「バンドギャップ」という）を発現するフォトニック結晶は、光および電磁波を制御する素子として使用可能である。例えば、フォトニック結晶中に欠陥を設け、光導波路を形成することで、フォトニック結晶を伝送線路として使用することが可能である（例えば、特許文献1、2参照）。

フォトニック結晶は、誘電率の周期構造が2次元である（以下、「2次元周期構造」という）フォトニック結晶と、誘電率の周期構造が3次元である（以下、「3次元周期構造」という）フォトニック結晶とに大別される。

初めて作製されたフォトニック結晶は、図12に示す、3次元周期構造の「ヤブロノバイト（Yablonovite）」である（非特許文献1参照）。図12に示すように、ヤブロノバイトは、誘電体ブロック81に所定間隔で三角配置された開口部82の各々から、その法線に対し35.26°の角度で3方向から120°の間隔で穿孔されることで作製される。なお、図12において、符号82a～82cは、穿孔方向を示している。

【0003】

ヤブロノバイト以降、2次元周期構造および3次元周期構造を問わず、数多くのフォトニック結晶が提案されている。それらのフォトニック結晶はマイクロマシン技術、ウエハー融着、半導体微細加工技術、自己クローニング技術、2光子吸収を用いたポリマーの重合反応、光造形法およびドライエング法等（以下、「マイクロマシン技術等」と総称する）を用いて作製されている。

マイクロマシン技術等を用いた方法の他には、エピタキシャル結晶成長方法を用いてフォトニック結晶を作製する方法（特許文献1参照）やマウンター機器を使用した方法（特許文献2参照）が提案されている。

【0004】

フォトニック結晶は、誘電率の異なる2種類以上の物質を用いて作製される。一般に、そのうちの1種類として空気を利用することが多いが、近年、SiやGaAs等の半導体技術に用いる誘電体や、高分子材料、光硬化樹脂、誘電体セラミックス等を組み合わせてフォトニック結晶を作製することも提案されている（例えば、特許文献1、2参照）。

【0005】

【特許文献1】特開2001-237616号公報（特許請求の範囲）

【特許文献2】特開2001-237617号公報（特許請求の範囲）

【非特許文献1】e. Yablonovitch, T. J. Gmitter and K. M. Leung: Phys. Rev. Lett. 67, 2295 (1991)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

フォトニック結晶の用途および需要が急速に拡大しているのにも拘わらず、マイクロマシン技術等は、いずれもその工法が複雑なために歩留まりが悪く、時間がかかるため量産に向かない。また、上述のように、エピタキシャル結晶成長方法を用いてフォトニック結晶を作製する方法（特許文献1参照）も提案されているが、エピタキシャル結晶成長が可能な誘電体の種類は自ずと限定されるとともに、所定の厚さまで誘電体をエピタキシャル結晶成長させるには膨大な時間を要する。さらに、マウンター機器を使用した方法（特許文献2参照）も提案されているが、より簡易かつ短時間でフォトニック結晶を得る技術が求められている。

また、誘電体ブロックを予め作製した後に、誘電体ブロックに所定パターンの孔を穿孔するという方法も考えられる。しかし、孔のピッチが微少なため、穿孔自体が困難である。

そこで、本発明は、量産性に優れたフォトニック結晶の製造方法等を提供することを課題とする。また、小型、高強度かつ高特性のフォトニック結晶を簡便に得るための技術、微細なパターンを備えたフォトニック結晶を得る技術を提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

かかる目的のもと、本発明者は様々な検討を行った。その結果、複数の誘電体セラミックスがそれぞれ同一面内に周期的に配置されたセラミックス複合体を積層することが、フォトニック結晶を作製する上で有効な方法であることを知見した。すなわち、本発明は、第1の誘電体と当該第1の誘電体と異なる比誘電率を有する第2の誘電体とが同一面内に周期的に配置されたセラミックス複合体が積層されて構成されたフォトニック結晶の製造方法であって、第1の誘電体に対応する部位に第1の誘電体を構成する第1のセラミックス組成物を配設し、第2の誘電体に対応する部位に第2の誘電体を構成する第2のセラミックス組成物を配設することにより、セラミックス複合体を作製することを特徴とする。ここで、第1のセラミックス組成物は、粉末状の第1の誘電体セラミックスと分散媒、バインダ樹脂等との混合物である。同様に、第2のセラミックス組成物は、粉末状の第2の誘電体セラミックスと分散媒、バインダ樹脂等との混合物である。第1および第2のセラミックス組成物の配設方法は特に限定されるものではないが、例えば印刷工法を用いて、両組成物をそれぞれ同一面内に配設することができる。

本発明におけるセラミックス複合体は、複数の誘電体セラミックスを含むことを1つの特徴としている。誘電体セラミックスは、SiやGaAs等の半導体技術に用いる誘電体や、高分子材料、光硬化樹脂よりも、比誘電率が大きい。このため、複数の誘電体セラミックスを含むセラミックス複合体を用いてフォトニック結晶を構成することで、小型かつ高強度のフォトニック結晶を得ることができる。

【0008】

第1のセラミックス組成物の配設および第2のセラミックス組成物の配設を行う形態としては、所定領域に第1のセラミックス組成物のみを配設した後に第2のセラミックス組成物を配設する（またはその逆）形態が例えば挙げられる。もしくは、所定領域に第1のセラミックス組成物および第2のセラミックス組成物とを、例えばグラビア印刷工法等を用いて1つの印刷工程で印刷するようにしてもよい。

【0009】

本発明のフォトニック結晶の製造方法では、セラミックス複合体の積層について第1および第2の2つの形態を包含している。

第1の形態は、第1のセラミックス組成物および第2のセラミックス組成物を含む複数のセラミックス複合体を予め作製した後に、セラミックス複合体を積層するというものである。

また、第2の形態は、まず、第1のセラミックス組成物のみを配設した後に、第2のセラミックス組成物を配設することによりセラミックス複合体を作製する。そして、セラミックス複合体上に、第1のセラミックス組成物（または第2のセラミックス組成物）を配設し、その後、第2のセラミックス組成物（または第1のセラミックス組成物）の他方を配設する。この工程を繰り返すことにより、セラミックス複合体を積層するというものである。

【0010】

本発明のフォトニック結晶の製造方法において、セラミックス複合体の積層体を焼成する工程をさらに備えることができる。セラミックス複合体の積層体を焼成することで、第1のセラミックス組成物に含まれる第1の誘電体セラミックスと第2のセラミックス組成物に含まれる第2の誘電体セラミックスは同時焼成されることとなる。よって、焼成工程を実施する場合には、第1の誘電体セラミックスおよび第2の誘電体セラミックスを、同

時焼成可能という条件を満たすようにして予め選択しておく。なお、セラミックス複合体の積層体をそのままフォトニック結晶として用いてもよいが、焼結体とすることで、機械的強度や誘電率がさらに向上する。

以上の本発明のフォトニック結晶の製造方法は、2次元周期構造を有するフォトニック結晶を作製する場合、3次元周期構造を有するフォトニック結晶を作製する場合のいずれであっても適用可能である。特に、本発明のフォトニック結晶の製造方法は、2次元周期構造を有するフォトニック結晶を作製するのに好適である。

#### 【0011】

さらに、本発明は、第1の誘電体と、第1の誘電体と異なる比誘電率を有する第2の誘電体とが所定の周期で配置されるフォトニック結晶であって、第1の誘電体および第2の誘電体はいずれも誘電体セラミックスであるフォトニック結晶を提供する。このフォトニック結晶では、第2の誘電体は直径2mm以下の円柱として、ブロック状の第1の誘電体の表裏面を貫通するように所定間隔毎に配置されている。上述した本発明におけるフォトニック結晶の製造方法を用いることで、こうした直径2mm以下という小径の円柱が誘電体ブロック中に複数配置されたフォトニック結晶を得ることが可能となる。

本発明におけるフォトニック結晶は2次元周期構造を有するものとして行うことができる。但し、直径2mm以下の円柱が、ブロック状の第1の誘電体の表裏面を貫通するように複数配置されたフォトニック結晶である限りは、2次元周期構造、3次元周期構造のいずれであっても本発明に包含される。

#### 【発明の効果】

#### 【0012】

本発明によれば、量産性に優れたフォトニック結晶の製造方法が提供される。また、本発明によれば、小型、高強度かつ高特性のフォトニック結晶を、簡便に製造することができる。

#### 【発明を実施するための最良の形態】

#### 【0013】

はじめに、本実施の形態におけるフォトニック結晶の製造方法の概要を説明する。本実施の形態では、第1の誘電体セラミックスと、この第1の誘電体セラミックスと異なる比誘電率を有する第2の誘電体セラミックスとを用いて、2次元周期構造または3次元周期構造を有するフォトニック結晶を作製する。

本実施の形態におけるフォトニック結晶は、第1の誘電体セラミックスと第2の誘電体セラミックスとが同一面内に周期的に配置されたセラミックス複合体が積層されて構成されている。

以下、添付図面に示す実施の形態に基づいてこの発明を詳細に説明する。

#### 【0014】

#### ＜フォトニック結晶の構造＞

図1は、本実施の形態におけるフォトニック結晶を示す斜視図である。

本実施の形態におけるフォトニック結晶10は、第1の誘電体1と、第2の誘電体2とを備える。第1の誘電体1は第1の誘電体セラミックスから構成され、一方、第2の誘電体2は第2の誘電体セラミックスから構成される。このフォトニック結晶10は、2次元周期構造を備えている。

#### 【0015】

フォトニック結晶10において、第2の誘電体2は直径2mm以下の円柱として、ブロック状の第1の誘電体1の表裏面を貫通するように所定間隔毎に配置されている。詳しくは後述するが、本実施の形態では、第1の誘電体セラミックスを含む第1の誘電体ペーストを直径2mm以下の複数の孔を含むパターンに印刷するとともに、この反転パターンで第2の誘電体セラミックスを含む第2の誘電体ペーストを印刷して得られたセラミックス複合体を積層してフォトニック結晶10を作製している。このため、直径2mm以下という小径の円柱をフォトニック結晶10中に形成させることが可能となっている。

#### 【0016】

なお、フォトニック結晶10に求められる特性に応じて、第2の誘電体2の配置、サイズ、形状等を適宜、設定することができる。よって、第2の誘電体2のサイズを直径2mmを超えるものとすることもできるし、形状を円柱状ではなく直方体状とすることも、もちろん可能である。

#### 【0017】

本実施の形態におけるフォトニック結晶10は、第1の誘電体1および第2の誘電体2として、いずれも誘電体セラミックスを使用することを特徴とする。このように、2種類の誘電体セラミックスを用いることで、高強度かつ高特性のフォトニック結晶10を得ることができる。また、上述したように、誘電体セラミックスは、SiやGaAs等の半導体技術に用いる誘電体や、高分子材料、光硬化樹脂よりも比誘電率が大きいため、素子を小型化することが可能となる。誘電体内の波長は比誘電率の平方根に反比例し、比誘電率の大きい材料ほど、波長短縮効果が大きく、素子の小型化に有利であるからである。

#### 【0018】

第1の誘電体セラミックスおよび第2の誘電体セラミックスは、フォトニック結晶10に求められる特性に応じて、例えば、チタン酸バリウム系セラミックス、チタン酸鉛系セラミックス、チタン酸ストロンチウム系セラミックス、二酸化チタン系セラミックス、バリウム・ネオジ・チタニウム系セラミックス、アルミナ系セラミックス、シリカ系セラミックス、ガラスコンポジット材料等の中から適宜選択される。

以下、第1の誘電体セラミックスおよび第2の誘電体セラミックスの選択基準を示す。

#### 【0019】

##### (第1の選択基準)

第1の誘電体セラミックスの比誘電率と、第2の誘電体セラミックスの比誘電率との比率が大きいほど、広帯域なバンドギャップを形成することができる。よって、第1の誘電体セラミックスの比誘電率と、第2の誘電体セラミックスの比誘電率との比率が大きくなるように、第1の誘電体セラミックスおよび第2の誘電体セラミックスをそれぞれ選択する。

一般的に、高周波用誘電体セラミックスの比誘電率は3～100程度であるため、第1の誘電体セラミックスとして比誘電率の低いものを選択する場合には、第2の誘電体セラミックスとして比誘電率の高いものを選択することで、広帯域なバンドギャップを形成することができる。逆に、第1の誘電体セラミックスを比誘電率の高いものとし、第2の誘電体セラミックスを比誘電率の低いものとすることで、比誘電率の比率を大きくして広帯域なバンドギャップを形成するようにしてもよい。

望ましい比誘電率の比率は、最終的に得たいフォトニック結晶10の特性等に依存する。

#### 【0020】

##### (第2の選択基準)

第1の誘電体セラミックスおよび第2の誘電体セラミックスとして、使用する周波数帯域において材料損失が少ない誘電体セラミックスを選択する。複数の誘電体セラミックスを用いてフォトニック結晶10を作製する場合において、フォトニック結晶10の用途によっては、それらの物質に起因する材料損失は無視することができないからである。損失が少ない誘電体セラミックスを用いてフォトニック結晶10を構成することで、フォトニック結晶10を用いた素子を損失の低いものとすることができる。

#### 【0021】

##### (第3の選択基準)

詳しくは後述するが、本実施の形態におけるフォトニック結晶10は、第1の誘電体セラミックスおよび第2の誘電体セラミックスを含むセラミックス複合体の積層体を焼成することで、作製される。よって、第1の誘電体セラミックスおよび第2の誘電体セラミックスとして、同時焼成が可能なもの、具体的には熱収縮のマッチングがとれているものを選択する。熱収縮のマッチングがとれているか否かは、同一温度で焼成した際の収縮率等で、判断すればよい。

## 【0022】

以上の選択基準に基づき、第1の誘電体セラミックスおよび第2の誘電体セラミックスを選択する。本実施の形態では、第1の誘電体セラミックスおよび第2の誘電体セラミックスの比誘電率の比率が大きくなるよう、第1の誘電体セラミックスとして比誘電率が低い誘電体セラミックスを使用し、一方、第2の誘電体セラミックスとして比誘電率が高い誘電体セラミックスを使用してフォトニック結晶10を作製する場合を例にして、以下の説明を行う。

## 【0023】

第1の誘電体1を構成する第1の誘電体セラミックスとしては、比誘電率が低いセラミックス材料やガラスコンポジット材料等を使用する。具体的には、 $\text{BaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ 系セラミックスや $\text{SiO}_2$ 系セラミックス、 $\text{B}_2\text{O}_3$ 系セラミックス、 $2\text{MgO}-\text{SiO}_2$ 系セラミックス、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 系セラミックス、 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ 系セラミックス、 $\text{ZrO}_2$ 系セラミックス等を第1の誘電体セラミックスとして用いることができる。これらは、いずれも比誘電率が2～20程度と低く、かつ誘電損失が低いため、第1の誘電体セラミックスとして好適である。

## 【0024】

第2の誘電体2を構成する第2の誘電体セラミックスとしては、比誘電率が高いセラミックス材料やガラスコンポジット材料等を使用する。具体的には、 $\text{BaO}-\text{Nd}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{ZnO}_2-\text{CuO}$ 系セラミックスや $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ 系セラミックス、 $\text{TiO}_2$ 系セラミックス、 $\text{BaO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{Nd}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ 系セラミックス、 $\text{BaO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{Nd}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{SrTiO}_3$ 系セラミックス、 $\text{BaO}-\text{PbO}-\text{Nd}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ 系セラミックス、 $\text{BaNd}_2\text{Ti}_5\text{O}_{14}$ 系セラミックス、 $\text{BaSm}_2\text{Ti}_5\text{O}_{14}$ 系セラミックス、 $\text{Ba}(\text{Zn}, \text{Nb})\text{O}_3$ 系セラミックス、 $\text{BaTi}_4\text{O}_9$ 系セラミックス、 $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$ 系セラミックス、 $(\text{Zr}, \text{Sn})\text{TiO}_4$ 系セラミックス、 $\text{Ba}(\text{Zn}, \text{Ta})\text{O}_3$ 系セラミックス、 $\text{Ba}(\text{Mg}, \text{Ta})\text{O}_3$ 系セラミックス、 $\text{MgTiO}_3-\text{CaTiO}_3$ 系セラミックス等を第2の誘電体セラミックスとして用いることができる。これらは、いずれも比誘電率が5～200程度と高く、かつ誘電損失が低いため、第2の誘電体セラミックスとして好適である。

## 【0025】

ここで、第1の誘電体セラミックスおよび第2の誘電体セラミックスの望ましい組合せを、以下に示しておく。

## 【0026】

## &lt;組合せ1&gt;

第1の誘電体セラミックス:

$\text{BaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ 系誘電体セラミックス (比誘電率6.4)

第2の誘電体セラミックス:

$\text{BaO}-\text{Nd}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{ZnO}_2-\text{CuO}$ 系誘電体セラミックス (比誘電率75.4)

## &lt;組合せ2&gt;

第1の誘電体セラミックス:

$\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3$ 系誘電体セラミックス (比誘電率4.7)

第2の誘電体セラミックス:

$\text{TiO}_2-\text{BaO}-\text{Nd}_2\text{O}_3$ -glass系誘電体セラミックス (比誘電率22)

## 【0027】

上述の組合せにおいて、比誘電率 $\epsilon$ が6.4である $\text{BaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ 系誘電体セラミックスと、比誘電率が75.4である $\text{BaO}-\text{Nd}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{ZnO}_2-\text{CuO}$ 系誘電体セラミックスとの組合せは、特に望ましい。両材料は、比誘電率の比率が約11.8と大きく、しかも熱収縮のマッチングがとれているため、同時焼成が可能であるからである。

## . 【0028】



ところで、2種類の誘電体材料を用いてフォトニック結晶を作製する場合には、誘電体材料のうち一方を空気とすることが多い。これに対し、本実施の形態におけるフォトニック結晶10では、複数種類の誘電体セラミックス、すなわち、第1の誘電体セラミックスおよび第2の誘電体セラミックスを用いてフォトニック結晶10を構成するようにしたので、製品の強度を向上させることができる。

#### 【0029】

フォトニック結晶10の寸法は、使用する周波数に応じて決定する必要がある。例えば、Kバンド(18~26.5GHz)において4~5周期分(なお、ここでの「周期」は第2の誘電体2を配置する周期を示す)の周期構造としたときに、本実施の形態におけるフォトニック結晶10の寸法は、8~12mm×2~6mm×16~20mm程度である。

#### 【0030】

次に、フォトニック結晶10の製造方法について説明する。

#### <第1の実施形態>

はじめに、第1および第2の誘電体セラミックスを含むセラミックス複合体を作製し、このセラミックス複合体を積層して誘電体ブロック(積層体)を形成し、フォトニック結晶10を得る例を、第1の実施形態として示す。

#### 【0031】

図2は、第1の実施形態におけるフォトニック結晶10の製造方法のフローチャートである。図3は、図2中に示したセラミックス複合体作製工程を模式的に示す断面図である。図4は、図2中に示した積層工程を模式的に示す図である。

#### 【0032】

図2に示すように、第1の実施形態では、第1および第2の誘電体セラミックス粉末、バインダ樹脂および分散媒等を混合して第1および第2の誘電体ペーストを作製する誘電体ペースト作製工程、第1および第2の誘電体ペーストを用いて第1および第2の誘電体セラミックス粉末を含むセラミックス複合体を作製するセラミックス複合体作製工程、セラミックス複合体を積層し積層体としての誘電体ブロックを得る積層工程、誘電体ブロックを所定形状に切り出す切り出し工程、切り出された成形体を焼成する焼成工程を含む。

以下、図2に示した各工程について詳述する。

#### 【0033】

#### <誘電体ペースト作製工程>

誘電体ペースト作製工程では第1の誘電体セラミックス粉末を含む第1の誘電体ペースト(第1のセラミックス組成物)、第2の誘電体セラミックス粉末を含む第2の誘電体ペースト(第2のセラミックス組成物)をそれぞれ作製する。なお、第1の誘電体セラミックス粉末と第2の誘電体セラミックス粉末とを区別する必要がある場合を除き、両者を総称して「誘電体セラミックス粉末」という。

#### 【0034】

まず、誘電体セラミックス粉末、バインダ樹脂および分散媒を3本ロールミル、ボールミル、らいかい機等で混合して、誘電体ペーストを得る。

誘電体セラミックス粉末の量は、誘電体ペーストに対して約20~60wt%とすればよい。誘電体セラミックス粉末の平均粒径は0.1~20 $\mu$ m程度とすればよい。誘電体セラミックス粉末として平均粒径が0.1~20 $\mu$ m程度の粉末を用いることで、高密度成形を可能としつつ、粉末の凝集を抑制することができ、周期構造を安定して形成することができる。誘電体セラミックス粉末の望ましい平均粒径は0.5~10 $\mu$ m、より望ましい平均粒径は0.5~5 $\mu$ mである。なお、2種類の誘電体セラミックスの焼成挙動を合わせるために、第1の誘電体セラミックス粉末のサイズと第2の誘電体セラミックス粉末のサイズを略同一としておくことが望ましい。

第1の実施形態では、後述する積層工程で熱圧着を行うため、バインダ樹脂としては熱可塑性であり、かつ高強度のものをを用いる。例えば、アクリル系樹脂、ブチラール系樹脂、エチルセルロース系樹脂等をバインダ樹脂として用いることができる。バインダ樹脂の

量は誘電体セラミックス粉末に対して約4～10wt%とすればよい。

また、分散媒としては、ブチルカルビトール、ブチルカルビトールアセテート、ターピネオール等の各種有機溶剤を用いることができる。これらを分散媒として用いるのは、上述したバインダ樹脂を溶解でき、かつ比較的、低沸点であるからである。

#### 【0035】

第1の実施形態では、可塑剤や分散剤をさらに添加することが望ましい。可塑剤は、使用するバインダ樹脂の種類に応じて選択する。上述したアクリル系樹脂等をバインダ樹脂とする場合には、例えばフタル酸系の可塑剤を使用することができる。可塑剤を添加する場合には、その添加量を誘電体セラミックス粉末に対し、0.1～5wt%程度とすればよい。分散剤は、使用する誘電体セラミックスの種類に応じて選択する必要があるが、例えばオレフィンマレイン酸コポリマーやオレイン酸を分散剤として用いることができる。分散剤を添加する場合には、その添加量を第1の誘電体セラミックスに対し、0.1～5wt%程度とすればよい。

#### 【0036】

分散媒の種類や量を適宜選択することで、誘電体ペーストの粘度を調整することができる。例えば、ブチルカルビトールは粘度が低く、一方、ターピネオールは粘度が高い。よって、両者を適当な比率で混合して分散媒とすることで、誘電体ペーストの粘度を印刷工法に適した粘度とすることができる。また、バインダ樹脂の種類や量を適宜選択することで、誘電体ペーストの粘度を調整することもできる。

誘電体ペーストの粘度が低すぎると、印刷だれが起き、印刷工法を用いたセラミックス複合体作製工程で所望の印刷パターンを形成することが困難となる。また、粘度が高すぎると、薄く印刷することができず、得られるセラミックス複合体の厚さが厚くなってしまう。仮に、こうした厚さの厚いセラミックス複合体を積層したとすると、厚さ方向のステップ数が少なくなるため、最終的に得られるフォトリソ結晶の厚さ方向の断面形状がいびつになりやすい。よって、誘電体ペーストの粘度は注意深く調整する必要がある。なお、誘電体ペーストの粘度は、印刷パターンや採用する印刷工法等も考慮して、適切な範囲に調整する。印刷工法としてスクリーン印刷工法を採用する場合には、誘電体ペーストの粘度は2Pa・s～50Pa・s程度とすればよい。

#### 【0037】

＜セラミックス複合体作製工程＞

続くセラミックス複合体作製工程では、第1の誘電体ペーストおよび第2の誘電体ペーストをそれぞれ印刷することで、第1および第2の誘電体セラミックスを含むセラミックス複合体を作製する。印刷は、第1の誘電体ペーストが第1の誘電体1に対応する部位に、第2の誘電体ペーストが第2の誘電体2に対応する部位に、それぞれ配設されるように行う。

#### 【0038】

図3は、セラミックス複合体作製工程を模式的に示す断面図である。

まず、図3(a)に示すように、1層目を構成することとなる第1の誘電体ペーストをフィルム（例えばPETフィルム）F上に所望の印刷パターンで印刷する。この印刷は、例えばスクリーン印刷工法を用いて行うことができる。印刷後、印刷された第1の誘電体ペーストは、加熱乾燥または自然乾燥される。

ここで、印刷パターンは、最終的にどのような周期構造を有するフォトリソ結晶10を得たいか、に応じて決定する。例えば、最終的に図1に示したようなハニカム構造のフォトリソ結晶10を得たい場合には、図5に示すような印刷パターンを採用する。図5に示した印刷パターンを採用した場合には、厚さ方向に貫通した孔hが六角格子状に規則的に形成された第1のセラミックス組成物11が得られる。

#### 【0039】

続いて、図3(b)に示すように、1層目の印刷パターンの反転パターンで、第2の誘電体ペーストを印刷する。印刷後、印刷された第2の誘電体ペーストは、加熱乾燥または自然乾燥される。

ここで、第2の誘電体ペーストを反転パターンで印刷するのは、第1のセラミックス組成物11に形成された孔hを、第2の誘電体ペースト、すなわち、第2のセラミックス組成物12で充填し、第1のセラミックス組成物11と第2のセラミックス組成物12とを同一面内に配置させるためである。第1のセラミックス組成物11および第2のセラミックス組成物12とで構成されるセラミックス複合体Cの表面が平滑になるよう、第1のセラミックス組成物11の厚さおよび第1のセラミックス組成物11の孔hのサイズに基づき、第2の誘電体ペーストの塗布量を制御する必要がある。

#### 【0040】

基体としてのフィルムFをセラミックス複合体Cから剥離した状態を、図4(a)に示す。セラミックス複合体Cは後述する積層工程で順次積層されることになるが、セラミックス複合体Cの厚さが薄すぎると、セラミックス複合体Cの強度が低く、ハンドリングが難しい。よって、積層工程におけるハンドリングのしやすさを考慮して、セラミックス複合体Cの厚さは1~800 $\mu\text{m}$ 、より望ましくは10~500 $\mu\text{m}$ 、さらに望ましくは20~200 $\mu\text{m}$ の範囲内とする。

#### 【0041】

##### <積層工程>

セラミックス複合体作製工程で所望の厚さを備えたセラミックス複合体Cを所定枚数作製した後、積層工程に進む。なお、積層工程に先立ち、予めフィルムFをセラミックス複合体Cから剥離しておく。

積層工程では、図4(b)に示すように、第1のセラミックス組成物11と第2のセラミックス組成物12とがそれぞれ所定の部位に配置されたセラミックス複合体Cを積層し、熱圧着する。この熱圧着は、セラミックス複合体Cを1枚積層する毎に行ってもよいし、複数枚積層してから行ってもよい。セラミックス複合体Cの積層および熱圧着により、図4(c)に示すような誘電体ブロック13が最終的に得られる。つまり、熱圧着はセラミックス複合体Cを一体化するために行う。

熱圧着の際の加熱温度は、第1の誘電体ペーストおよび第2の誘電体ペーストを作製する際に用いたバインダ樹脂成分に依存する。例えば、ペースト作製に用いたバインダ樹脂がアクリル樹脂である場合には、加熱温度を70~90℃に設定すればよい。熱圧着は、セラミックス複合体Cがそれぞれ積層ずれをおこさずにきちんと接着されることが重要なので、大きな圧力を付与する必要はない。圧力は、セラミックス複合体Cの厚さに応じて適宜設定すればよいが、20~80 $\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度に設定すればよい。

#### 【0042】

セラミックス複合体Cの積層体である誘電体ブロック13は、所定の周期構造を有する。図4(c)の例では、円柱状の第2の誘電体2が、誘電体ブロック13の表裏面を貫通するようにして多数配置されて、ハニカムパターンの2次元周期構造を形成している。なお、図4(c)では、セラミックス複合体Cの積層数が6枚の例を示したが、積層数は特に限定されるものではなく、最終的に得たいフォトニック結晶10のサイズ等に応じて適宜決定する。

#### 【0043】

得られた誘電体ブロック13の密度を増加させるために、切り出し工程に先立って熱プレスを行ってもよい。熱プレスの条件も、セラミックス複合体Cを作製する際に使用したバインダ樹脂等に依存するが、例えば圧力は500~2000 $\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度に設定すればよい。また、誘電体ペースト作製に用いたバインダ樹脂がアクリル樹脂である場合には、加熱温度を70~90℃に設定すればよい。

但し、第1のセラミックス組成物11と第2のセラミックス組成物12の弾性挙動が相違するような場合には、熱プレスにより、両材質間に応力が発生して成形体にクラックが発生する場合がある。よって、熱プレスを行う際には、第1のセラミックス組成物11と第2のセラミックス組成物12とが同等の弾性挙動をもつように、材料の選択等を行う必要がある。例えば、第1の誘電体ペースト中のバインダ樹脂と同じ樹脂を用いて第2の誘電体ペーストを作製することで、第1のセラミックス組成物11と第2のセラミックス組

成物 12 との弾性挙動を合わせることができる。

#### 【0044】

##### <切り出し工程>

切り出し工程では、最終的に得られるフォトニック結晶 10 の用途に応じて、誘電体ブロック 13 を所定形状に切り出す。

#### 【0045】

##### <脱バインダ処理>

誘電体ブロック 13 には、セラミックス複合体 C を作製する際に使用した多くのバインダ樹脂成分が含有されているため、焼成工程に先立ち、予め脱バインダ処理を行う。脱バインダ処理は通常の条件、つまり、バインダが分解でき、ネックグロスが始まらない条件で行えばよい。例えば、大気中、昇温速度：30～120℃/h、保持温度：400～600℃、保持時間：0～2時間で脱バインダ処理を行う。

脱バインダ処理を行った後に得られる成形体をそのままフォトニック結晶 10 として用いてもよい。第 1 のセラミックス組成物 11 を第 1 の誘電体 1 に対応する部位に、第 2 のセラミックス組成物 12 を第 2 の誘電体 2 に対応する部位に、それぞれ配設してセラミックス複合体 C を作製し、このセラミックス複合体 C を厚さ方向に積層することで、誘電体ブロック 13 を作製した。よって、第 1 のセラミックス組成物 11 に相当する部分が第 1 の誘電体 1 となり、第 2 のセラミックス組成物 12 に相当する部分の第 2 の誘電体 2 となる。

以下に示す焼成工程を行い、成形体を焼結体とすることで、機械的強度や誘電率がさらに向上したフォトニック結晶 10 を得ることができる。

#### 【0046】

##### <焼成工程>

脱バインダ処理を行った後、焼成工程に進む。焼成工程では、成形体を所定の焼成条件で焼成する。

焼成条件は、第 1 および第 2 の誘電体セラミックスの種類等に応じて適宜設定すればよい。例えば、大気中、昇温速度：300～1200℃/h、保持温度：800～1000℃、保持時間：0.1～3時間で焼成する。

焼成工程において、成形体中の第 1 の誘電体セラミックスと第 2 の誘電体セラミックスは同時焼成される。よって、上述したように、両材質、つまり、第 1 の誘電体セラミックスと第 2 の誘電体セラミックスとの焼成挙動を十分にマッチングさせておく必要がある。

#### 【0047】

以上、第 1 の実施形態におけるフォトニック結晶 10 の製造方法を詳述した。複雑な工程を要しないことから、第 1 の実施形態におけるフォトニック結晶 10 の製造方法によれば、フォトニック結晶 10 を簡易かつ短時間で作製することができる。よって、第 1 の実施形態におけるフォトニック結晶 10 の製造方法は、量産性に優れる。

#### 【0048】

なお、セラミックス複合体 C を積層する際に、接着層を介在させて、接着強度を増加させてもよい。この場合には、図 4 に示した積層工程で、表面または裏面に薄い接着層を印刷したセラミックス複合体 C を順次積層させればよい。

また、上述した積層工程では、フィルム F からセラミックス複合体 C を剥離して、セラミックス複合体 C を順次積層する例を示したが、セラミックス複合体 C 同士を熱圧着した後、フィルム F を剥離するようにしてもよい。例えば、図 3 (b) に示したセラミックス複合体 C の上に、フィルム F が付着された状態のセラミックス複合体 C を、セラミックス複合体 C 同士が対向するように積層し、熱圧着した後に、フィルム F を剥離するようにしてもよい。この際、セラミックス複合体 C 同士の間に接着層を介在させて、一方のセラミックス複合体 C が他方のセラミックス複合体 C 上に転写されるようにしてもよい。

#### 【0049】

##### <第 2 の実施形態>

第 1 の実施形態では、複数のセラミックス複合体 C を予め作製した後、このセラミック

ス複合体Cを積層して誘電体ブロック13を形成し、図1に示した形状を備えたフォトリソグラフィック結晶10を得る例を示した。第2の実施形態では、第1のセラミックス組成物11を配設した後に、第2のセラミックス組成物12を配設することによりセラミックス複合体Cを作製し、このセラミックス複合体C上に、第1のセラミックス組成物11を配設した後に第2のセラミックス組成物12を配設することを繰り返すことによりセラミックス複合体Cが積層される例を示す。より具体的には、第2の実施形態では、第1の誘電体セラミックスを含む第1の誘電体ペーストと、第2の誘電体セラミックスを含む第2の誘電体ペーストとを交互に印刷することで、セラミックス複合体Cの積層体としての誘電体ブロックを形成し、図1に示した形状を備えたフォトリソグラフィック結晶10を得る例を示す。

#### 【0050】

図6は、第2の実施形態におけるフォトリソグラフィック結晶10の製造方法のフローチャートである。また、図7は、図6中に示した誘電体ブロック作製工程を模式的に示す図である。

#### 【0051】

図6に示すように、第2の実施形態では、第1および第2の誘電体セラミックス粉末、バインダ樹脂および分散媒等を混合し第1および第2の誘電体ペーストを作製する誘電体ペースト作製工程、誘電体ペースト作製工程で得られた第1の誘電体ペーストを所定パターンに印刷する第1の印刷工程と、誘電体ペースト作製工程で得られた第2の誘電体ペーストを第1の印刷工程における印刷パターンと反転パターンで印刷する第2の印刷工程と、第1の印刷工程および第2の印刷工程を繰り返すことで得られる誘電体ブロックを所定形状に切り出す切り出し工程、所定形状に切り出された成形体を焼成する焼成工程を含む。

以下、図6に示した各工程について詳述する。

#### 【0052】

##### <誘電体ペースト作製工程>

可塑剤を添加する必要がない点、バインダ樹脂として以下のものを用いる以外は、基本的に第1の実施形態と同様の手順で第1の誘電体ペーストおよび第2の誘電体ペーストを作製する。

第2の実施形態では、第1および第2の誘電体ペーストを交互に印刷してセラミックス複合体Cの積層体としての誘電体ブロックを得るため、第1の実施形態で行った熱圧着は不要となる。よって、熱可塑性であることはバインダ樹脂の選択基準として必須の要件ではなく、高強度であり、かつ粘度調整および脱バインダ処理がしやすいものを、第2の実施形態におけるバインダ樹脂として選択する。バインダ樹脂としては、エチルセルロース系樹脂、ブチラール系樹脂等を用いることができる。第2の実施形態でも、バインダ樹脂の量は誘電体セラミックス粉末に対して約4～10wt%とすればよい。

また、分散媒としては、第1の実施形態と同様に、ターピネオール、ブチルカルビトール等の各種有機溶剤を用いることができる。分散媒の種類や量を適宜選択することで、誘電体ペーストの粘度を調整することができる。誘電体ペーストの粘度が低すぎると、印刷だれが起き、続く印刷工程で所望の印刷パターンを形成することが困難となる。また、粘度が高すぎると、レベリング不良が起きやすい。よって、誘電体ペーストの粘度は、得ようとするセラミックス複合体Cの厚さや印刷パターン、印刷工程で用いる印刷工法等も考慮して、適切な範囲に調整する。

#### 【0053】

##### <誘電体ブロック作製工程>

誘電体ブロック作製工程は、誘電体ペースト作製工程で得られた第1の誘電体ペーストを所定パターンに印刷する第1の印刷工程と、誘電体ペースト作製工程で得られた第2の誘電体ペーストを第1の印刷工程における印刷パターンと反転パターンで印刷する第2の印刷工程とを含む。

#### 【0054】

図7は、誘電体ブロック作製工程を模式的に示す断面図である。

(第1の印刷工程)

まず、図7(a)に示すように、1層目を構成することとなる第1の誘電体ペーストをフィルム(例えばPETフィルム)F上に所望の印刷パターンで印刷する。ここで、印刷パターンは、最終的にどのような周期構造を有するフォトニック結晶10を得たいか、に応じて決定する。印刷された第1の誘電体ペーストを加熱乾燥または自然乾燥することで、厚さ方向に貫通した孔hが規則的に形成された第1のセラミックス組成物11が得られる。

#### 【0055】

(第2の印刷工程)

続いて、図7(b)に示すように、第1の印刷工程における印刷パターンの反転パターンで、第2の誘電体ペーストを印刷する。印刷後、印刷された第2の誘電体ペーストは、加熱乾燥または自然乾燥され、第2のセラミックス組成物12となる。第2のセラミックス組成物12の厚さが、第1のセラミックス組成物11の厚さと等しくなるように、第2の印刷工程では、第1のセラミックス組成物11の厚さおよび第1のセラミックス組成物11の孔hのサイズに基づき、第2の誘電体ペーストの塗布量を制御する。

#### 【0056】

第1の印刷工程および第2の印刷工程を経ることで、図7(b)に示したようなセラミックス複合体CがフィルムF上に形成される。

続いて、図7(c)に示すように、セラミックス複合体Cの上に、2層目を構成することとなる第1の誘電体ペーストが印刷され、乾燥される。第1の誘電体ペーストを乾燥することで、セラミックス複合体Cの上に、厚さ方向に貫通した孔hが規則的に形成された第1のセラミックス組成物11が新たに配設される。次に、図7(d)に示すように、第1の印刷工程における印刷パターンの反転パターンで、第2の誘電体ペーストを印刷する。印刷後、印刷された第2の誘電体ペーストは、加熱乾燥または自然乾燥され、第2のセラミックス組成物12となる。

同様の手順で、所望の厚さを有する積層体を得られるまで、印刷および乾燥を繰り返す。これにより、図7(e)に示すような、誘電体ブロック13A、つまり、セラミックス複合体Cの積層体を得られる。積層体中のセラミックス複合体Cにおいて、第1の誘電体1に対応する部位に第1のセラミックス組成物11が、第2の誘電体2に対応する部位に第2のセラミックス組成物12がそれぞれ配設されている。なお、原則、第2の実施形態ではプレスする必要はないが、誘電体ブロック13Aに対して熱プレス等を行ってもよい。熱プレスされた状態の誘電体ブロック13Aを図7(f)に示しておく。

#### 【0057】

また、印刷は、第1のセラミックス組成物11の厚さに応じてスクリーン印刷、グラビア印刷、凸版印刷、オフセット印刷等の公知の印刷工法を適宜選択することができる。

#### 【0058】

<切り出し工程、脱バインダ処理、焼成工程>

印刷工程後、基体としてのフィルムFは誘電体ブロック13Aから剥離され、続く切り出し工程に進む。切り出し工程、脱バインダ処理、焼成工程は、第1の実施形態で示したのと同様の条件で行えばよい。なお、第1の実施形態と同様に、脱バインダ処理を行った後に得られる成形体をそのままフォトニック結晶10として用いてもよい。

#### 【0059】

以上、詳述したように、第2の実施形態では、第1の誘電体ペーストを所望の印刷パターンで印刷する工程と、第1の誘電体ペーストを印刷する際に用いた印刷パターンの反転パターンで第2の誘電体ペーストを印刷する工程とを繰り返すことで、誘電体ブロック13Aを形成し、図1に示した形状を備えたフォトニック結晶10を得るようにした。第2の実施形態におけるフォトニック結晶10の製造方法も、複雑な工程を要しないことから、第2の実施形態におけるフォトニック結晶10の製造方法によれば、フォトニック結晶10を簡易かつ短時間で作製することができる。よって、第2の実施形態におけるフォトニック結晶10の製造方法も、量産性に優れる。

なお、印刷工法で作製したセラミックス複合体Cを、印刷工法で積層する例を示したが



、印刷工法で作製したセラミックス複合体Cを第1の実施形態で示した積層工程のような要領で積層してもよい。

#### 【0060】

以上に示した第1および第2の実施形態では、他の誘電体材料よりも比誘電率が高い誘電体セラミックスを使用してフォトニック結晶10を作製するようにしたので、素子サイズを小さくすることができる。さらに、比誘電率の比率が大きい2種類の誘電体セラミックスを使用してフォトニック結晶10を作製するようにしたので、広帯域のバンドギャップを得ることができる。第1および第2の実施形態におけるフォトニック結晶10は、特にマイクロ波～サブミリ波領域にバンドギャップを持ち、導波路、フィルタ、レゾネータ、分波器等として好適に用いられる。

#### 【0061】

なお、第1の誘電体セラミックスおよび第2の誘電体セラミックスを用いてフォトニック結晶10を作製する例を示したが、さらに第3の誘電体を使用してフォトニック結晶を作製することもできる。このように、さらに第3の誘電体を使用してフォトニック結晶を作製することで、新たな周期構造を備えたフォトニック結晶を得ることができる。ここで、第3の誘電体は空気であってもよいし、第3の誘電体セラミックスであってもよい。第3の誘電体を第3の誘電体セラミックスとする場合には、例えば、第1および第2の実施形態において、第2の誘電体ペーストを印刷する工程において、第1のセラミックス組成物11に形成された複数の孔hのうち、一部の孔hには第2の誘電体セラミックス粉末を含む第2の誘電体ペーストを印刷し、残りの孔hには第3の誘電体セラミックス粉末を含む第3の誘電体ペーストを印刷すればよい。

#### 【0062】

また、第1および第2の実施形態では、同一の印刷パターンで作製したシート状のセラミックス複合体Cが積層されることで、2次元周期構造を備えたフォトニック結晶10を得る例を示したが、印刷パターンを各シート毎に適宜変更させることももちろん可能である。例えば、3次元周期構造のフォトニック結晶を作製する場合には、印刷パターンが異なるシートを複数積層するようにすればよい。この場合はシートの厚さをできるだけ薄くすることで、3次元周期構造のパターンを厚さ方向に滑らかに変化するものとすることができる。本発明のフォトニック結晶の製造方法によれば、印刷パターンの形状を適宜選択することで、所望の周期構造を備えたフォトニック結晶10を得ることができるため、周期構造の自由度も高い。

#### 【0063】

以上、第1および第2の実施形態を示したが、これはあくまで一例であって、本発明の主旨を逸脱しない範囲で、種々様々な変形を行ってもよい。以下に変形例を示す。

#### 【0064】

##### <変形例1>

上述した第1および第2の実施形態では、第1のセラミックス組成物11の配設と第2のセラミックス組成物12の配設を異なる時期に行う例を示したが、第1のセラミックス組成物11の配設と第2のセラミックス組成物12の配設を実質的に同時期に行うようにしてもよい。例えば、図8に示すフローチャートに基づき、第1の誘電体ペーストと第2の誘電体ペーストとを同時に印刷するという工程を繰り返すことで、セラミックス複合体Cの作製および積層を行うこともできる。なお、図8に示した印刷工程以外は、第2の実施形態と同様に行えばよい。

具体的には、図9(a)に示すように、1層目を構成することとなる第1の誘電体ペーストおよび第2の誘電体ペーストをフィルム（例えばPETフィルム）F上に所望の印刷パターンで印刷、すなわち実質的に同時期に配設する。印刷された第1の誘電体ペーストおよび第2の誘電体ペーストを乾燥させた後、図9(b)に示すように、1層目のセラミックス複合体Cの上に、第1の誘電体ペーストおよび第2の誘電体ペーストを所望の印刷パターンで同時に印刷する。印刷された第1の誘電体ペーストおよび第2の誘電体ペーストを乾燥することで、2層目のセラミックス複合体Cが得られる。

同様の手順で、所望の厚さを有する積層体を得られるまで、 $n$ 層目の誘電体層の上に、 $(n+1)$ 層目を構成することとなる第1の誘電体ペーストおよび第2の誘電体ペーストを印刷し、乾燥するという工程を繰り返す。これにより、図9(c)に示すような、誘電体ブロック13A、つまり、セラミックス複合体Cの積層体を得るようにしてもよい。この形態は、セラミックス複合体Cの作製と積層とがほぼ同時に進行するということができる。

ここで、所定領域に対して第1および第2の誘電体ペーストを印刷する場合には、印刷開始から印刷終了までには所定の時間が経過するから、印刷開始時と印刷終了時とは厳密な意味では第1のセラミックス組成物11および第2のセラミックス組成物12の配設は同時にはならない。そこで、このような形態を包含する概念として「実質的に同時期」という表現を用いている。

なお、実質的に同時期に得られたセラミックス複合体Cを、第1の実施形態と同様の手順で積層するようにしてもよい。

#### 【0065】

##### <変形例2>

例えば、図10(a)に示すような、孔 $h$ が所定パターンで形成された第1のセラミックス組成物11を得る。次いで、孔 $h$ に第2のセラミックス組成物12を充填してセラミックス複合体Cを得た後、図10(b)に示すように、第2のセラミックス組成物12を印刷、つまり配設する。そして、図10(c)に示すように、第2のセラミックス組成物12の周囲を覆うように、第1のセラミックス組成物11を印刷、つまり配設するようにしてもよい。もしくは、図10(a)に示した第1のセラミックス組成物11を得た後に、第1のセラミックス組成物11の厚さよりも第2のセラミックス組成物12の厚さが厚くなるように、第1のセラミックス組成物11の孔 $h$ 内に第2のセラミックス組成物12を充填し、さらに図10(c)に示したように、第2のセラミックス組成物12の周囲を覆うように、第1のセラミックス組成物11を配設するようにしてもよい。

#### 【実施例】

#### 【0066】

以下、本発明を具体的な実施例に基づいて説明する。

##### (実施例1)

図2のフローチャートに基づきフォトリソグラフィ結晶を作製した例を、実施例1として示す。

第1の誘電体セラミックス粉末として、平均粒径が $0.7\mu\text{m}$ の $\text{BaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ 系粉末（比誘電率：6.4）を準備した。また、第2の誘電体セラミックス粉末として、平均粒径が $1.0\mu\text{m}$ の $\text{BaO}-\text{Nd}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{ZnO}-\text{CuO}$ 系粉末（比誘電率：75.4）を準備した。はじめに、第1の誘電体セラミックス粉末、分散媒、バインダ樹脂および分散剤とをボールミルを用いて混合し、第1の誘電体ペーストを作製した。この際、第1の誘電体セラミックス粉末および分散媒の比率は、45:55（wt%）とした。また、バインダ樹脂は第1の誘電体セラミックス粉末に対して5wt%添加し、分散剤は第1の誘電体セラミックス粉末に対して1wt%添加した。分散剤、バインダ樹脂および分散媒の種類は以下の通りとした。

#### 【0067】

分散剤：オレフィンマレイン酸コポリマー（商品名：共栄（株）製 フローレンG-700）

バインダ樹脂：エチルセルロース

分散媒：ターピネオール50vol%、ブチルカルビトール50vol%の混合溶液

#### 【0068】

次に、第2の誘電体セラミックス粉末、分散媒、バインダ樹脂および分散剤とをボールミルを用いて混合し、第2の誘電体ペーストを作製した。第2の誘電体セラミックス粉末および分散媒の比率は、第1の誘電体ペーストと同様に45:55（wt%）とした。ま



た、バインダ樹脂は第2の誘電体セラミックス粉末に対して5wt%添加し、分散剤は第2の誘電体セラミックス粉末に対して1wt%添加した。分散剤、バインダ樹脂および分散媒の種類も、第1の誘電体ペーストと同様である。なお、第1の誘電体ペーストおよび第2の誘電体ペーストの粘度は、いずれも15Pa・sである。

#### 【0069】

次いで、スクリーン印刷工法により、第1の誘電体ペーストをPETフィルム上に印刷した。第1の誘電体ペーストの印刷は、図5に示したパターンで行い、貫通孔が所定パターンで配置された第1のセラミックス組成物を得た。なお、貫通孔の直径が1mmとなるように、印刷の制御を行った。

第1のセラミックス組成物の貫通孔に、スクリーン印刷工法により、第2の誘電体ペーストを充填した。第1のセラミックス組成物の厚さおよび貫通孔のサイズを考慮して第2の誘電体ペーストの充填量を制御することで、最終的に表面が平滑なセラミックス複合体を得た。

こうして得られたセラミックス複合体を120枚積層し、円柱状の第2の誘電体セラミックスがハニカムパターンで配置された誘電体ブロックを得た。なお、熱圧着はセラミックス複合体を1枚積層する毎に行った。熱圧着の条件は以下の通りである。

#### 【0070】

圧力: 45 kgf/cm<sup>2</sup>

加熱温度: 85℃

保持時間: 1秒

#### 【0071】

続いて、以下の条件で誘電体ブロックに対して脱バインダ処理を行い、その後、焼成して試料を得た。得られた試料の写真を図11に示す。なお、この試料のサイズは、10.6mm×4.3mm×18mmである。

図11に示すように、第2の誘電体から構成される円柱と、この円柱を覆う第1の誘電体との界面には、ボイドやクラックは観察されなかった。

#### 【0072】

<脱バインダ処理条件>

雰囲気: 空気

昇温速度: 60℃/h

保持温度: 500℃

保持時間: 0

<焼成条件>

雰囲気: 空気

昇温速度: 600℃/h

保持温度: 910℃

保持時間: 1h

#### 【0073】

得られた試料を導波管内に静置し、ネットワークアナライザ (Agilent Technologies社製 HP-8510C) にて反射および透過特性を測定した。その結果、Kバンドに属する20~24GHzにて、25dB以上の減衰が確認され、バンドギャップが生成していることが明らかとなった。

#### 【0074】

(実施例2)

図6のフローチャートに基づきフォトニック結晶を作製した例を、実施例2として示す。

実施例1で示した2種類の誘電体セラミックス粉末、分散媒、バインダ樹脂および分散剤を使用して、実施例1と同様の手順で第1の誘電体ペーストと第2の誘電体ペーストを作製した。但し、第1の誘電体ペーストにおいて、第1の誘電体セラミックス粉末および分散媒の比率は50:50 (wt%)とした。また、第2の誘電体ペーストにおいても、

第2の誘電体セラミックス粉末および分散媒の比率は50:50 (wt%)とした。第1の誘電体ペーストおよび第2の誘電体ペーストの粘度はいずれも20 Pa・sである。なお、第1の誘電体ペーストおよび第2の誘電体ペースト中のバインダ樹脂および分散剤の添加量は、実施例1と同様である。

#### 【0075】

次いで、スクリーン印刷工法により、第1の誘電体ペーストをPETフィルム上に印刷した。第1の誘電体ペーストの印刷は、図5に示したパターンで行い、貫通孔が所定パターンで配置された第1のセラミックス組成物を得た。なお、貫通孔の直径が1 mmとなるように、印刷の制御を行った。

第1のセラミックス組成物の貫通孔に、スクリーン印刷工法により、第2の誘電体ペーストを充填した。第1のセラミックス組成物の厚さおよび貫通孔のサイズを考慮して第2の誘電体ペーストの充填量を制御することで、最終的に表面が平滑なセラミックス複合体を得た。

次いで、セラミックス複合体の上に、第1の誘電体ペーストを印刷、乾燥させて第1のセラミックス組成物を得た後、第1の誘電体ペーストの印刷パターンの反転パターンで第2の誘電体ペーストを印刷した。このように、第1の誘電体ペーストの印刷、乾燥、第2の誘電体ペーストの印刷、乾燥という工程を、60回繰り返して、円柱状の第2の誘電体セラミックスがハニカムパターンで配置された誘電体ブロックを得た。

#### 【0076】

続いて、誘電体ブロックに対して脱バインダ処理を行い、その後、焼成して試料を得た。なお、この試料のサイズは、10.6 mm×4.3 mm×18 mmである。また、脱バインダ処理の条件および焼成条件は実施例1と同様である。

#### 【0077】

得られた試料を導波管内に静置し、実施例1と同様の条件で反射および透過特性を測定した。その結果、Kバンドに属する20~24 GHzにて、20 dB以上の減衰が確認され、バンドギャップが生成していることが明らかとなった。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0078】

【図1】 図1は本実施の形態におけるフォトニック結晶を示す斜視図である。

【図2】 第1の実施形態におけるフォトニック結晶の製造方法のフローチャートである。

【図3】 図2中に示したセラミックス複合体作製工程を模式的に示す断面図である。

【図4】 図2中に示した積層工程を模式的に示す断面図である。

【図5】 2次元周期構造を有するフォトニック結晶を作製する際に用いるパターンの一例を示す図である。

【図6】 第2の実施形態におけるフォトニック結晶の製造方法のフローチャートである。

【図7】 図6中に示した誘電体ブロック作製工程を模式的に示す断面図である。

【図8】 第1のセラミックス組成物の配設と第2のセラミックス組成物の配設を実質的に同時期に行う場合の、フォトニック結晶の製造方法のフローチャートである。

【図9】 図8中に示した印刷工程を模式的に示す断面図である。

【図10】 セラミックス複合体を得るための変形例を説明するための図である。

【図11】 実施例1で得られた2次元周期構造を有する試料の写真である。

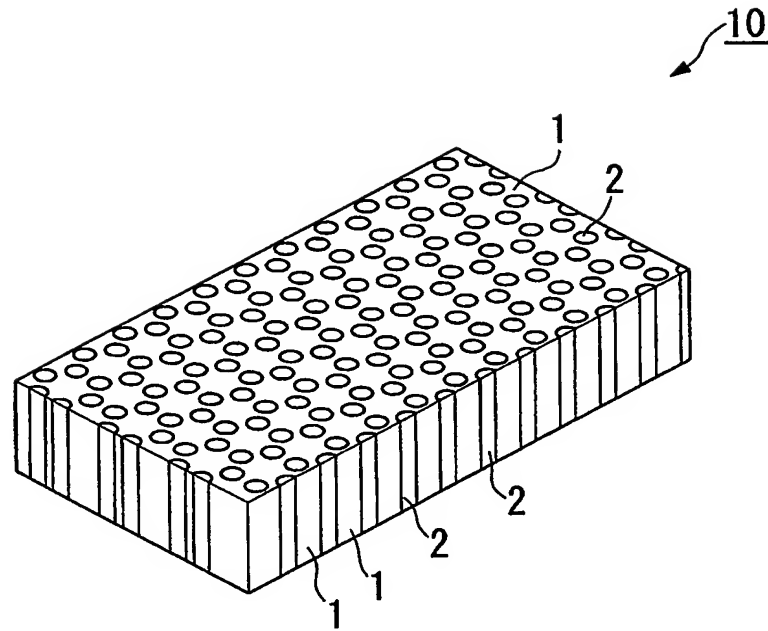
【図12】 3次元周期構造を有するフォトニック結晶として知られるヤブロノバイト (Yablonovite) の斜視図である。

#### 【符号の説明】

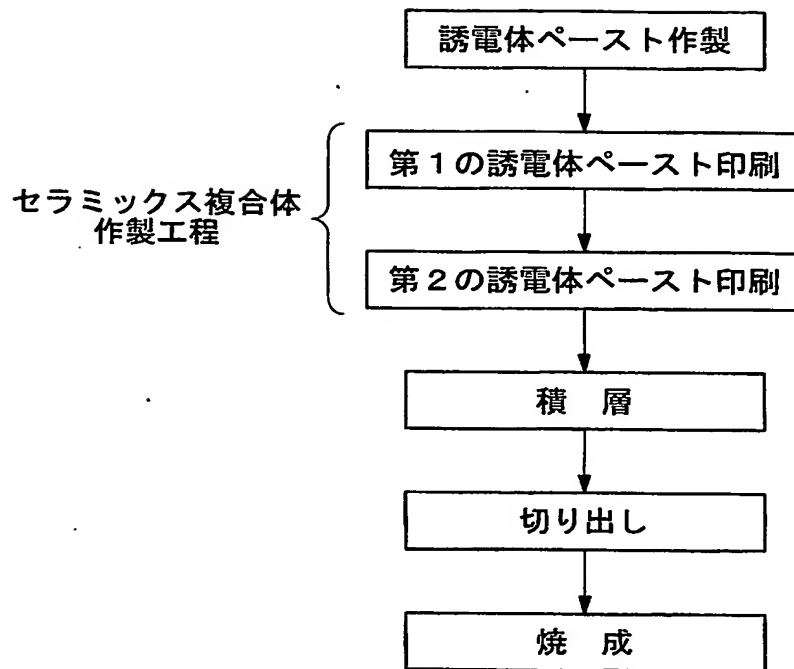
#### 【0079】

1…第1の誘電体、2…第2の誘電体、10…フォトニック結晶、11…第1のセラミックス組成物、12…第2のセラミックス組成物、13, 13A…誘電体ブロック、h…孔、C…セラミックス複合体

【書類名】 図面  
【図 1】

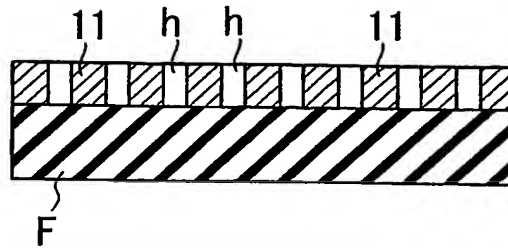


【図 2】



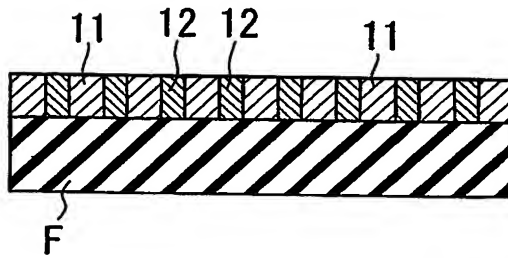
【図 3】

(a)

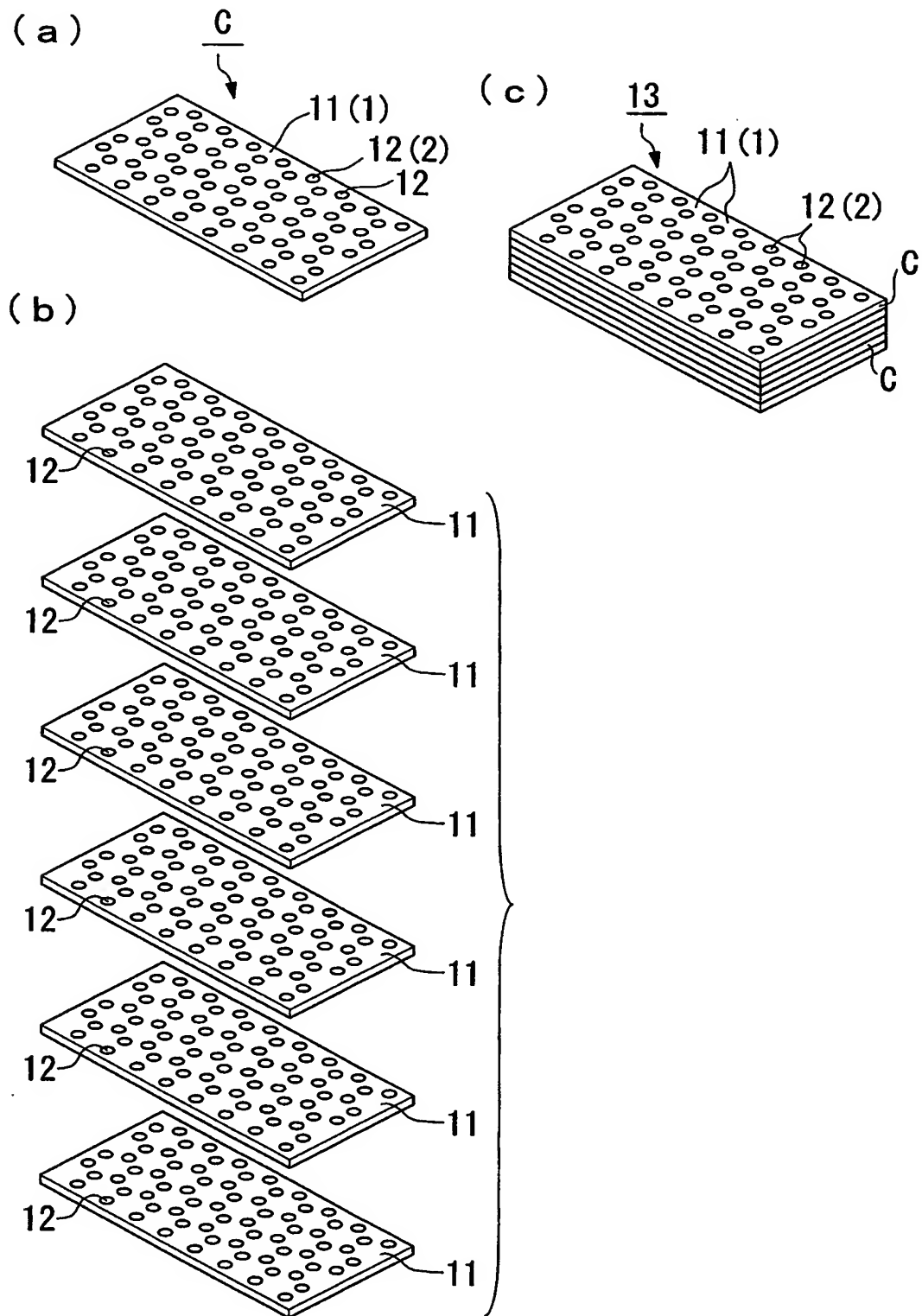


(b)

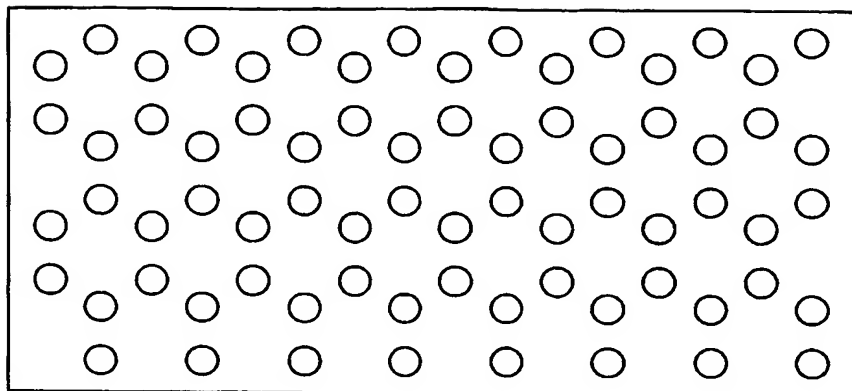
C  
↘



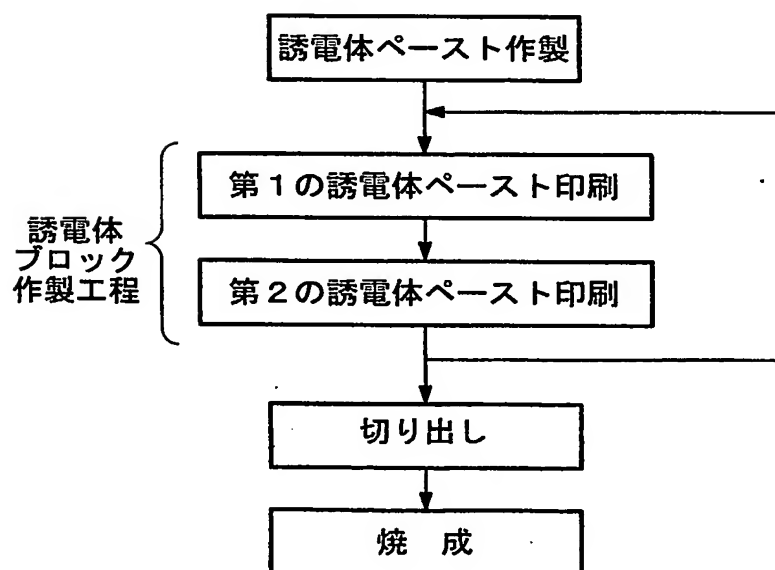
【図 4】



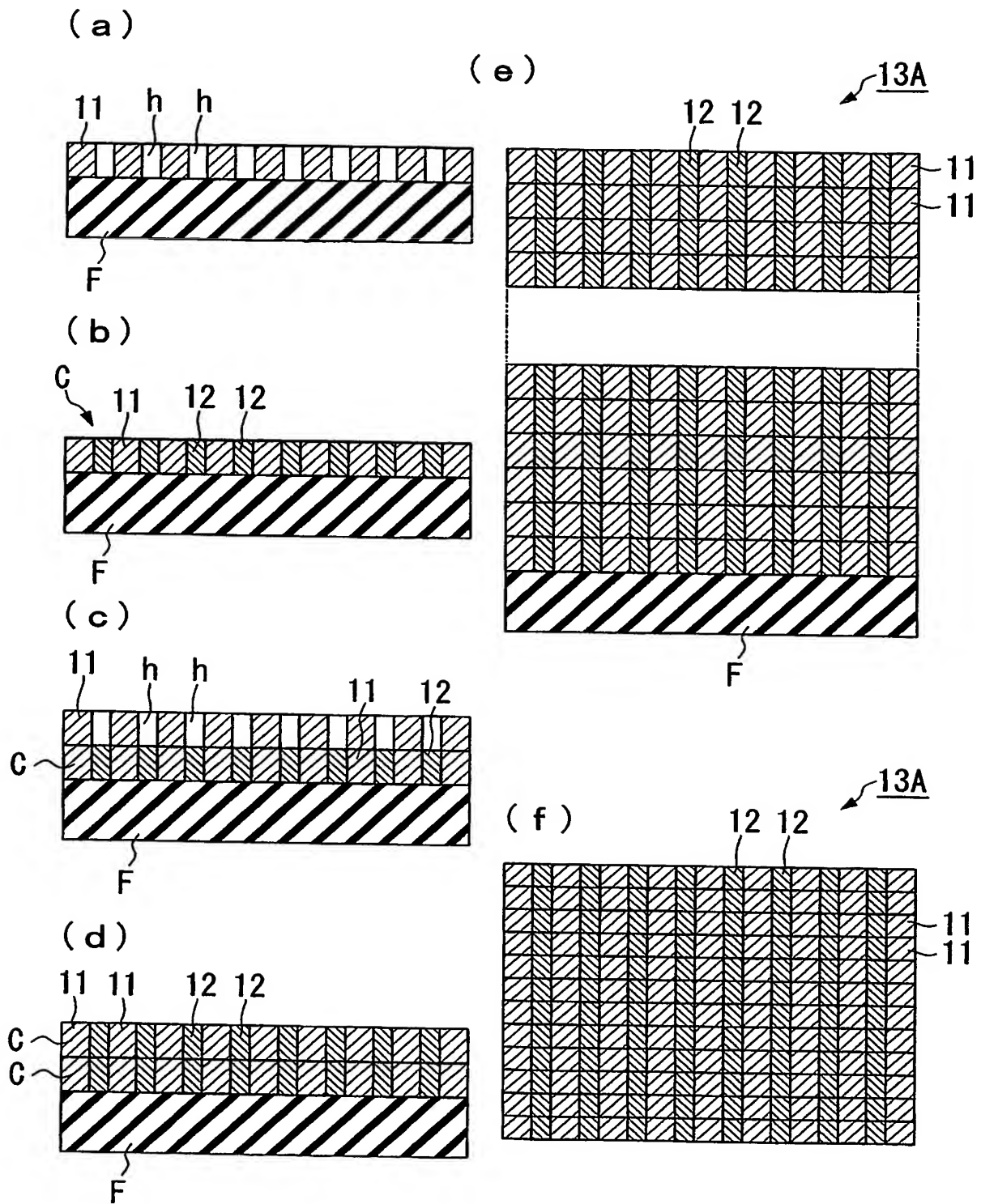
【図 5】



【図 6】

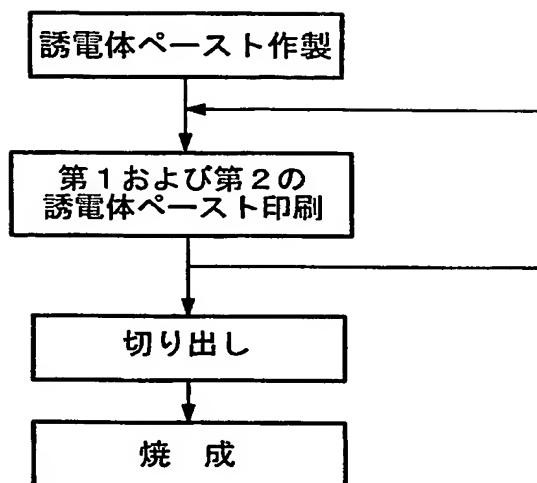


【図 7】

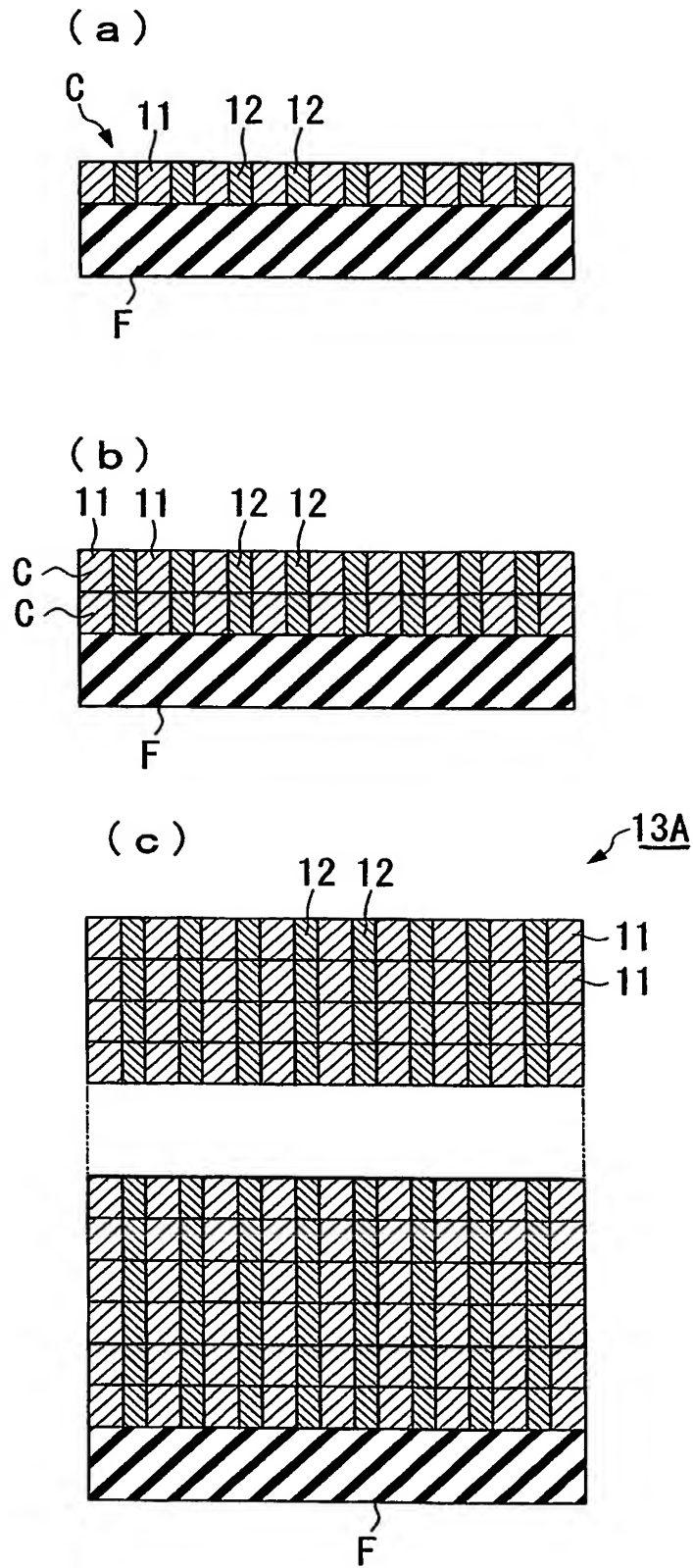




【図 8】

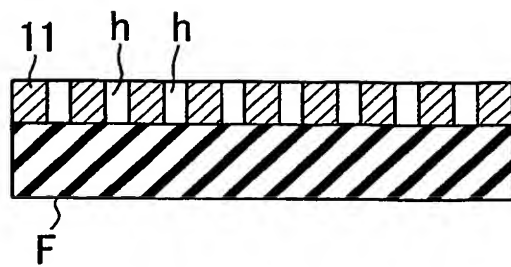


【図 9】

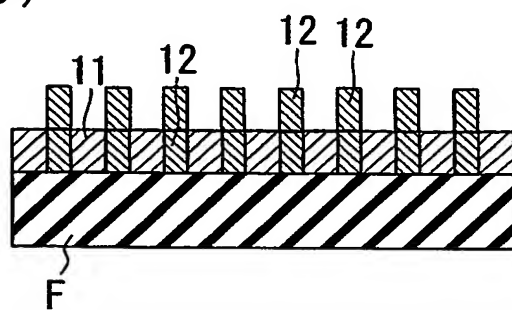


【図 10】

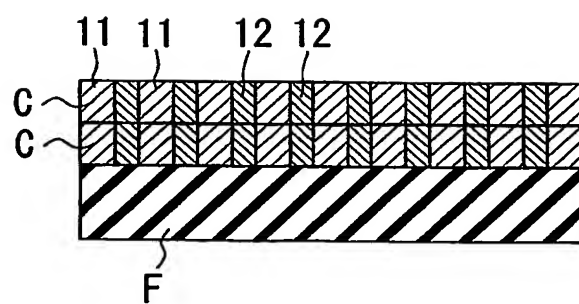
(a)



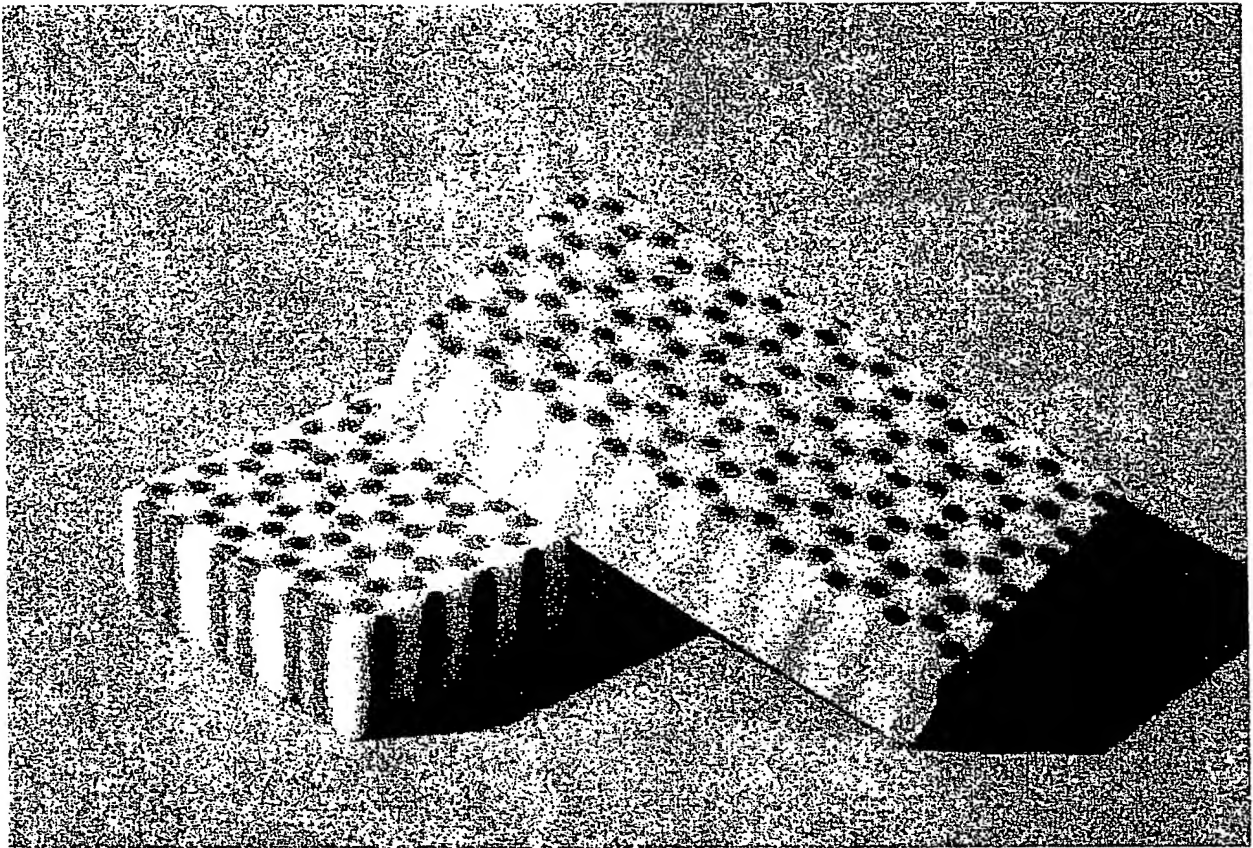
(b)



(c)

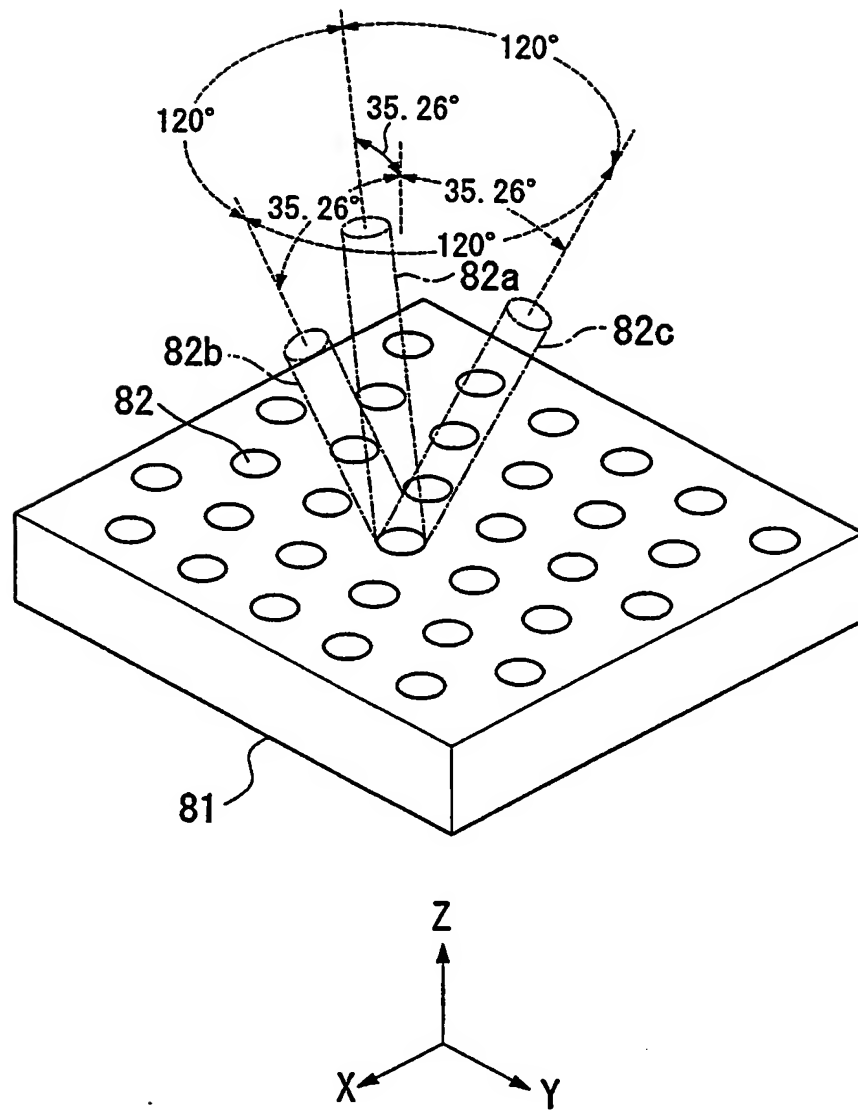


【図 11】



BEST AVAILABLE COPY

【図 12】



【書類名】要約書

【要約】

【課題】 量産性に優れたフォトニック結晶の製造方法等を提供する。

【解決手段】 第1の誘電体セラミックスを含む第1のセラミックス組成物11と第2の誘電体セラミックスを含む第2のセラミックス組成物12とが同一面内に周期的に配置されたセラミックス複合体Cを作製する。次いで、セラミックス複合体Cを積層することで、フォトニック結晶を構成することとなる誘電体ブロック13を得るようにした。これにより、特に複雑な工程を要することなく、第1および第2の誘電体セラミックスが周期的に配置されたフォトニック結晶を得ることが可能となる。誘電体セラミックスは、高分子材料等の他の誘電体よりも比誘電率が大きいため、誘電体として誘電体セラミックスを使用することで、フォトニック結晶の小型化を図ることができる。

【選択図】 図4

特願 2 0 0 3 - 2 8 8 1 1 0

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[ 0 0 0 0 0 3 0 6 7 ]

1. 変更年月日

2 0 0 3 年 6 月 2 7 日

[変更理由]

名称変更

住 所

東京都中央区日本橋 1 丁目 1 3 番 1 号

氏 名

T D K 株式会社

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☐ BLACK BORDERS

☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES

☐ FADED TEXT OR DRAWING

☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING

☐ SKEWED/SLANTED IMAGES

☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS

☐ GRAY SCALE DOCUMENTS

☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT

☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY

☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**